

Die Grundbegriffe der newtonschen Mechanik

Rainer Müller, TU Braunschweig

1 Axiom oder Gesetz?

In den meisten Darstellungen der newtonschen Mechanik werden die Grundbegriffe (wie Masse oder Kraft) und Grundgesetze (newtonsches Bewegungsgesetz, Trägheitsgesetz) mit einem auffällig geringen Aufwand an begrifflicher Schärfe eingeführt. Fachliche Darstellungen und Schulbücher unterscheiden sich hierin nur wenig (auch z. B. [1] bildet keine Ausnahme). Das liegt unter anderem daran, dass die Thematik tatsächlich außerordentlich komplex ist. Das newtonsche Axiomensystem bildet ein Geflecht aus Begriffsfestlegungen und empirischen Gesetzmäßigkeiten, das nicht einfach zu entwirren ist und sich gegen eine lineare Darstellung geradezu sträubt. Diese Schwierigkeit ist bereits von jeher gesehen worden. Schon Heinrich Hertz [2] schrieb 1894, „dass es sehr schwer ist, gerade die Einleitung in die Mechanik denkenden Zuhörern vorzutragen, ohne einige Verlegenheit, ohne das Gefühl, sich hier und da entschuldigen zu müssen, ohne den Wunsch, recht schnell über die Anfänge hinwegzugelangen zu Beispielen, welche für sich selbst reden.“

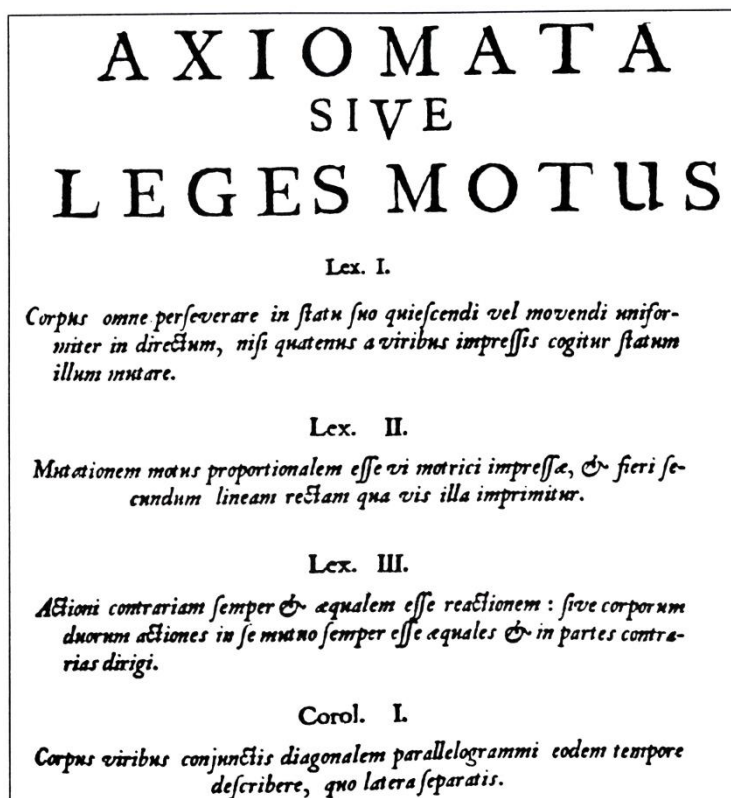


Abb. 1: Axiome oder Gesetze der Bewegung? Newton verwendet beide Begriffe.

Die Problematik wird bereits bei Newton deutlich, der in seinen „Principia“ in Bezug auf den Status seiner Grundgesetze unklar bleibt. Sind es „Axiome“, also unhinterfragte Forderungen, die ähnlich wie in mathematischen Axiomensystemen an den Anfang der Überlegungen gestellt werden und eigentlich nur die verwendeten Begriffe festlegen? Oder sind es Naturgesetze, die einer

experimentellen Prüfung fähig sind und sich auch als empirisch falsch erweisen können? Zwischen beiden Möglichkeiten schwankend, überschreibt er die entsprechenden Abschnitte mit „Axiomata sive leges motus“, also „Axiome oder Gesetze der Bewegung“ (Abb. 1).

Für den Unterricht in der Mechanik ist das eine unglückliche Situation. Denn selbst wenn es nicht möglich ist, den Unterschied zwischen Axiom, Begriffsdefinition und empirischer Gesetzmäßigkeit immer herauszuarbeiten, sollte er Lehrerinnen und Lehrern doch bewusst sein. Doch schon der Blick in die Schulbücher zeigt: Zur Einführung der newtonschen Gesetze in der Oberstufe wird zwar ein hoher Aufwand getrieben. Aber gerade in Bezug auf den Status der newtonschen Gesetze und ihrer Begrifflichkeit sind die Darstellungen meist vage, verwirrend oder gar inkonsistent.

Der vorliegende Artikel stellt den Versuch dar, in dieser Hinsicht mehr Klarheit zu schaffen. Gleich zu Anfang muss allerdings gesagt werden, dass die Komplexität des Themas eine eindeutige Klärung nicht zulässt. Es kann hier verschiedene Zugänge geben. Auch wenn die Argumentation sehr komplex erscheint – einfacher geht es wohl nicht. Es handelt sich hier keineswegs um den Versuch, eine möglichst pedantische Einführung zu geben. Im Gegenteil geht es um den einfachst möglichen zirkelfreien Zugang. Jede weitere Vereinfachung in der Darstellung ist didaktische Reduktion.

Es ist klar, dass der im Folgenden beschriebene Zugang zu komplex für den Unterricht in der Schule ist. Es ist auch nicht das Ziel des Artikels, den Mechanikunterricht noch schwerer verständlich zu machen, als er schon ist. Im Gegenteil: Es soll gezeigt werden, dass die komplizierten Argumentationen, die vor allem im Zusammenhang mit dem Fahrbahnversuch in vielen Schulbüchern zu finden sind, weit davon entfernt sind, die angestrebte wissenschaftliche Strenge zu erreichen. Vielleicht ist es unter diesen Umständen sinnvoll, die ohnehin nicht erreichte Strenge für eine bessere Verständlichkeit zu opfern.

Der Versuch, die Gesetze der Mechanik auf einer begrifflich tragfesten Grundlage einzuführen, wird oft als „axiomatischer Zugang“ bezeichnet – eine vielleicht nicht ganz glückliche Bezeichnung, denn der Status der einzuführenden Begriffe und Gesetze soll ja erst geklärt werden. Die bekannteste Axiomatik der newtonschen Mechanik stammt von Ludwig [3]. Während er viel Sorgfalt auf die Klärung der kinematischen Größen verwendet, bleibt seine Darstellung gerade im Hinblick auf das zweite newtonsche Gesetz und auf die Definitionen von Masse und Kraft merkwürdig unbefriedigend. Die beiden Begriffe bleiben bei Ludwig im Wesentlichen unerklärt; es wird hier auf die experimentelle Erfahrung verwiesen.

Die vorliegende Arbeit stützt sich insbesondere auf die Sichtweise von Audretsch [4, 5], dessen Zugang sich als „konstruktive Axiomatik“ bezeichnen lässt. Sein Ausgangspunkt sind nicht abstrakte Begriffe, sondern Handlungen und Beobachtungen. Ähnlich geartete Ansätze verfolgt Ehlers [6] in einer Axiomatik der allgemeinen Relativitätstheorie.

2 Offene Fragen

Sammeln wir zunächst einige Fragen, die in den Darstellungen der newtonschen Mechanik meist offen bleiben und dadurch das Verständnis erschweren:

1. Ist das Trägheitsgesetz nur ein Sonderfall des newtonschen Bewegungsgesetzes? Geht es tatsächlich aus $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ hervor, wenn $\vec{F} = 0$ ist? Newton hat beide Gesetze als unabhängige Axiome angeführt. Ist ihm wirklich in all den Jahrzehnten der Arbeit an den Principia nicht aufgefallen, dass die geradlinig-gleichförmige Bewegung gleichbedeutend mit $\vec{a} = 0$ ist?

2. Die Gleichung $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ definiert den Begriff der Masse, aber auch den Begriff der Kraft. Wie kann eine einzige Gleichung zwei Begriffe gleichzeitig definieren? Ist die Definition dadurch nicht unterbestimmt?
3. Wenn die Gleichung $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ tatsächlich eine Definitionsgleichung ist, dann kann sie grundsätzlich nicht wahr oder falsch sein. Warum führen wir dann aber Experimente durch, um sie empirisch zu testen? Weshalb kommt uns die experimentelle Überprüfung von $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ nicht ebenso sinnlos vor wie ein Projekt zur Überprüfung der Frage, ob alle Schimmel wirklich weiße Pferde sind?
4. Falls die Gleichung $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ nicht nur eine Definitionsgleichung ist: Ist es logisch überhaupt möglich, dass eine Gleichung gleichzeitig Definition (die nicht wahr oder falsch sein kann) und Naturgesetz (das empirisch prüfbar sein muss) sein kann?
5. Ist es vielleicht nötig, die Begriffe Kraft und (träge) Masse logisch unabhängig vom newtonschen Bewegungsgesetz zu definieren? Dann wäre dieses ein empirisches Gesetz, das bekannte Größen in Beziehung setzt, ähnlich wie z. B. $E = \frac{1}{2}mv^2$ Geschwindigkeit und kinetische Energie verknüpft. Wie aber ließe sich die träge Masse unabhängig von $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ einführen?

3 Theoriefreie Begriffsdefinitionen?

Ein scheinbar einfacher Ausweg aus dem Problem der Begriffsdefinitionen entpuppt sich leider als Sackgasse. Man könnte zum Beispiel argumentieren, dass im SI-Einheitensystem bereits zweifelsfrei definiert ist, was ein Kilogramm ist. Masse ist das, was wir mit einer Waage messen, und als Referenz dient das in Paris aufbewahrte Urkilogramm.

Eine solche Überlegung entspricht dem fünften Aufzählungspunkt oben. Der Begriff der Masse ließe sich isoliert von sonstigen mechanischen Begriffen durch ein Messverfahren festlegen, jedenfalls für alle praktischen Zwecke. Damit hätten wir einen festen Punkt gewonnen, von dem aus wir in der Festlegung der anderen Begriffe der Mechanik voranschreiten könnten.

Leider ist dieser Ansatz zum Scheitern verurteilt. Er scheitert zusammen mit der Illusion, man könne theoriefrei messen. Der Versuch, die naturwissenschaftliche Erkenntnis auf theoriefreie Beobachtungen, auf „Protokollsätze“, zu stützen, wurde im Logischen Empirismus zu Beginn des 20. Jahrhunderts unternommen. Er ist spätestens mit Pierre Duhems Einwand über die „Theoriebeladenheit der Beobachtung“ [7] gescheitert, dem zufolge bei einem Experiment niemals eine Einzelaussage, sondern immer ein ganzes Bündel von Theorien geprüft wird – denn zur Interpretation der Wahrnehmungen benötigen wir immer Theorien, wie unsere Messgeräte funktionieren. Duhem führt das Beispiel der Lupe an, unter der die Objekte einen Rand, bestehend aus den Regenbogenfarben, aufzuweisen scheinen – ohne die Interpretation durch eine optische Theorie sind bereits bei diesem einfachen Instrument die reinen Beobachtungssätze von begrenztem Wert.

Im vorliegenden Zusammenhang ist der Begriff der Masse relevant. Können wir die Masse nicht einfach theoriefrei durch das Urkilogramm und ein einfaches Messverfahren zum Massenvergleich definieren? Um zu zeigen, dass dies nicht möglich ist, betrachten wir ein besonders einfaches Messgerät: die Balkenwaage. Um mit ihr festzustellen, ob die Masse eines Gegenstandes exakt ein Kilogramm beträgt, legt man den Gegenstand in die eine Schale der Balkenwaage und das Urkilogramm in die andere Schale. Aber halt: Lassen sich mit der Balkenwaage eigentlich

Gegenstände mit unterschiedlichem Volumen vergleichen? Nur durch Rückgriff auf unser Theoriewissen können wir sagen, dass das keineswegs der Fall ist. Denn Gegenstände mit unterschiedlichem Volumen verdrängen unterschiedlich viel Luft und erfahren daher unterschiedliche Auftriebskräfte.

Zum Messen mit der Balkenwaage brauchen wir somit eine Korrekturtheorie, die zumindest die Hydrostatik umfassen muss. Da die Hydrostatik aber kaum ohne die Begriffe Masse oder Dichte formulierbar ist, sind wir in einem logischen Zirkel gefangen: Um den Begriff der Masse durch die Messung mit einer Balkenwaage einzuführen, benötigen wir eine Messtheorie, die den Begriff der Masse bereits voraussetzt.

Auch die zur Festlegung der heutigen SI-Einheiten verwendeten Messtheorien sind keineswegs elementar oder einfach, sondern umfassen das gesamte verfügbare physikalische Wissen. Beispielsweise muss zur Realisierung der Sekunde mit Hilfe von Atomuhren die allgemeine Relativitätstheorie herangezogen werden. Ohne die von ihr vorhergesagte Abhängigkeit des Uhrengangs vom Gravitationspotential könnte man den Gangunterschied zweier Atomuhren, deren Standhöhe sich nur um wenige Zentimeter unterscheidet, nicht verstehen. In ähnlich komplexer Weise wird im Rahmen der Revision des SI das Kilogramm neu definiert: durch Festlegung des numerischen Werts der planckschen Konstante h , der charakteristischen Größe der Quantenphysik.

4 Das Münchhausen-Trilemma

Bei der Balkenwaage ist das Problem des Luftauftriebs natürlich nicht unüberwindlich. Zum Beispiel könnte man die Waage im Vakuum betreiben. Dieser Einwand trifft aber nicht den hier gemeinten Punkt. Es geht um das erkenntnistheoretische Problem der Letztbegründung. Jede Argumentation – nicht nur in der Physik – braucht einen gesicherten Ausgangspunkt in Form von grundlegenden Sätzen, die nicht weiter angezweifelt werden. Diese grundlegenden Sätze sind aber nicht auf einfache Weise zu bekommen. Der Philosoph Hans Albert hat mit seinem „Münchhausen-Trilemma“ [8] erläutert, weshalb das Problem der Letztbegründung aus logischen Gründen scheitern muss:

Wenn man für alles eine Begründung verlangt, muss man auch für die Erkenntnisse, auf die man jeweils die zu begründende Auffassung ... zurückgeführt hat, wieder eine Begründung verlangen. Das führt zu einer Situation mit drei Alternativen, die alle drei unakzeptabel erscheinen, also: zu einem Trilemma, das ich angesichts der Analogie, die zwischen unserer Problematik und dem Problem, das der bekannte Lügenbaron einmal zu lösen hatte, das Münchhausen-Trilemma nennen möchte. Man hat hier offenbar nämlich nur die Wahl zwischen:

- 1. einem infiniten Regress, der durch die Notwendigkeit gegeben scheint, in der Suche nach Gründen immer weiter zurückzugehen, der aber praktisch nicht durchzuführen ist und daher keine sichere Grundlage liefert;*
- 2. einem logischen Zirkel in der Deduktion, der dadurch entsteht, dass man im Begründungsverfahren auf Aussagen zurückgreift, die vorher schon als begründungsbedürftig aufgetreten waren, und der ebenfalls zu keiner sicheren Grundlage führt; und schließlich:*
- 3. einem Abbruch des Verfahrens an einem bestimmten Punkt, der zwar prinzipiell durchführbar erscheint, aber eine willkürliche Suspendierung des Prinzips der zureichenden Begründung involvieren würde.*

Ein Beispiel für einen logischen Zirkel haben wir bei der Balkenwaage bereits gefunden. Alberts Argumentation zeigt, dass es sich hierbei nicht um einen Einzelfall handelt, sondern dass man bei jedem Versuch einer Letztbegründung bei einer der drei Alternativen landet.

Der infinite Regress entsteht durch das Immer-weiter-Fragen, das man von den „Und warum?“-Fragen von Kindern gut kennt, bei denen man dazu neigt, die dritte Alternative, den Abbruch des Verfahrens mit einem „Weil es eben so ist“, anzuwenden.

Ein anderes Beispiel für den Abbruch des Verfahrens sind die Axiomensysteme der Mathematik: Euklids Axiome der Geometrie werden nicht begründet, sondern gelten als gesetzt. Auch der Rückzug auf nicht hinterfragte für wahr gehaltene Sätze (Glaubenssätze, Dogmen oder Offenbarungen) fällt in diese Kategorie.

5 Fundierung in der Alltagspraxis

Das Münchhausen-Trilemma lehrt uns, dass Letztbegründungen nicht zu erreichen sind. Das gilt auch für den Anfang der Mechanik. Wir dürfen hier nicht mit strengen Begriffsdefinitionen oder unhintergehbaren Grundwahrheiten rechnen. Hier liegt vermutlich der tiefere Grund für das Unbehagen vieler Physiker an den Grundlagen der Mechanik, das Hertz in der anfangs zitierten Passage so deutlich zum Ausdruck gebracht hat.

Die Antwort der konstruktivistischen Axiomatik auf das Münchhausen-Trilemma ist die Fundierung in der Alltagspraxis, in der vorwissenschaftlichen Erfahrung. Auch ohne wissenschaftlichen Massebegriff haben die Menschen schon immer Mehl und Butter gewogen, sie haben Bier und Wein abgemessen und sich über Längen und Zeiten verständigt. All dies geschah nicht mit großer Präzision, aber historisch sind es tatsächlich die einfachen Verfahren gewesen, aus denen sich die präzisen wissenschaftlichen Messungen allmählich entwickelt haben. Der konstruktivistische Zugang reagiert auf das Münchhausen-Trilemma dadurch, dass die Alltagspraxis einen Satz von Begriffen zur Verfügung stellt, der für die vorläufige Verständigung ausreicht und von denen jeder bei Bedarf hinterfragt und ausgeschärft werden kann, aber nicht muss. Die Alltagspraxis stellt somit eine gemeinsame Verständigungsbasis bereit, von der ausgehend die wissenschaftlichen Begriffe ausgeschärft werden können. Durch Bezug auf das „immer schon“ [9] wird aus dem logischen Zirkel eine Spirale.

Beim Entwickeln der newtonschen Mechanik muss man zum Beispiel zunächst nicht genauer klären, was unter einer „geraden Linie“ zu verstehen ist. Die gespannte Schnur, die Maurer und Gärtner von jeher zum Herstellen geradliniger Wände und Beete nutzen, reicht als vorläufige Begriffsexplikation aus. Später, bei Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie, muss der Begriff der geraden Linie tatsächlich neu gefasst und durch den Begriff der Geodäten in einer gekrümmten Raum-Zeit ersetzt werden. Diesen Schritt muss man dann aber nicht aus dem Nichts heraus tun, sondern man hat bereits das entwickelte Begriffssystem der newtonschen Mechanik als Ausgangspunkt zur Verfügung.

Die begriffliche Spirale verläuft somit in einer ungebrochenen Linie von der handwerklichen Alltagspraxis über die newtonsche Mechanik bis hin zu den Effekten der allgemeinen Relativitätstheorie, die nur mit den empfindlichsten Detektionsmethoden nachweisbar sind.

6 Trägheitsgesetz und Inertialsysteme

Das Trägheitsgesetz erläutert den Begriff des **Inertialsystems**, der die Voraussetzung für die Formulierung des newtonschen Bewegungsgesetzes bildet. Es handelt sich um spezielle Bezugssysteme, die sich dadurch auszeichnen, dass sie *linear unbeschleunigt* und *nichtrotierend* sind. Damit ist nicht gemeint „unbeschleunigt und nichtrotierend relativ zu bestimmten anderen Körpern“ sondern „unbeschleunigt und nichtrotierend in einem absoluten Sinn“. Was dies bedeutet, bedarf einer Erklärung. Interessanterweise gehört das Auffinden dieser Erklärung zu den erkenntnistheoretisch anspruchsvollsten Problemen der Mechanik. Erstaunlich ist das deshalb, weil wir körperlich *spüren* können, wenn wir uns in einem beschleunigten Bezugssystem befinden – der Reiz von Kettenkarussell und Achterbahn liegt genau darin. Trotzdem ist es verblüffend schwierig, beschleunigte Bezugssysteme von Inertialsystemen abzugrenzen, ohne in eine zirkuläre Definition des Kraftbegriffs zu geraten (den wir an dieser Stelle noch nicht als wissenschaftlichen Terminus voraussetzen dürfen).

Der Begriff des Inertialsystems wurde erst 1885, also 200 Jahre nach Newton, von Ludwig Lange eingeführt. Vorher begnügte man sich mit dem „absoluten Raum“ und der „absoluten Zeit“, die Newton in seinen Principia als Voraussetzung für die Beschreibung von Bewegungen zugrunde legte. Problematisch war, dass niemand einen Bezugskörper für den absoluten Raum angeben konnte. Die Erde war es ganz sicher nicht, was man mit Foucaults Pendelversuch auch experimentell demonstrieren konnte. Aber auch die Sonne konnte man nicht als Referenz heranziehen, denn die Eigenbewegung mancher Sterne war bekannt, und wieso sollte ausgerechnet die Sonne im absoluten Raum ruhen? Der absolute Raum erwies sich also als ein gedankliches Konstrukt ohne offensichtliche Realisierung in der beobachtbaren Realität. Darüber hinaus erschien es unbefriedigend, die Formulierung des Trägheitsgesetzes von bestimmten Objekten der Astronomie abhängig zu machen, von den „Zufälligkeiten des Weltalls“. Ein Grundgesetz der Mechanik sollte sich vielmehr auf rein dynamische Begriffe beziehen.

Bei Lange sind es „sich selbst überlassene“ Punkte oder Teilchen, deren Bahnen wir beobachten. Das Wort Punkte ist hierbei nicht mathematisch zu verstehen, sondern soll nur bedeuten, dass die räumliche Ausdehnung der betrachteten Objekte (Bälle oder Ähnliches) für die Überlegungen keine Rolle spielt. Wie man von hier, bezugnehmend zunächst nur auf Alltagsbegriffe, in einer Spiralbewegung zum Trägheitsgesetz und zum Begriff des Inertialsystems gelangt, soll im Folgenden dargestellt werden.

7 Bezugssysteme und geradlinige Bewegung

Um die Bewegung von Körpern beschreiben zu können, müssen wir Orte und Zeiten angeben. Die Bezugssysteme, auf die sich unsere Messungen immer beziehen müssen, legen wir zunächst in handwerklich denkbar einfacher Weise fest. Wir spannen Schnüre, die uns gerade Linien festlegen und bringen an ihnen durch wiederholtes Abtragen eines Längenmaßes (zum Beispiel eines Stöckchens) Abstandsmarkierungen an.

Ein dreidimensionales rechtwinkliges Gitter aus gespannten Schnüren lässt sich mit einem Winkelmaß realisieren, das wir mittels einer Pythagoras-Konstruktion (Dreieck mit den Seitenlängen 3, 4 und 5 Einheiten) anfertigen. Dieses Gitter legt ein Bezugssystem für die Beschreibung von Bewegungen fest. Es ist nicht eindeutig; es gibt viele solcher Bezugssysteme, die durch Drehungen und Relativbewegungen auseinander hervorgehen.

Ein erster Begriff, den wir mit dem so hergestellten Gitter festlegen können, ist der Begriff der **geradlinigen Bewegung**. Wenn wir ein Bezugssystem finden können, in dem sich ein Körper entlang einer der gespannten Schnüre bewegt, dann sagen wir, dass sich der Körper geradlinig bewegt. Damit ist noch keine empirische Aussage über die Natur verbunden. Zu jeder Bewegung lassen sich immer Bezugssysteme finden, in dem sich der betreffende Körper geradlinig bewegt, ja sogar Bezugssysteme, in denen der Körper ruht. Ein solches Bezugssystem heißt ein **Ruhsystem** für den betreffenden Körper.

8 Freie Teilchen

Inertialsysteme werden durch die Bewegung von „freien“ oder „sich selbst überlassenen“ Teilchen definiert – womit unverkennbar gemeint ist, dass auf die betrachteten Teilchen keine Kräfte wirken sollen. Da wir aber an dieser Stelle auf den wissenschaftlichen Kraftbegriff noch nicht zurückgreifen können, weil wir ja gerade daran arbeiten, ihn durch die Abweichung von der kräftefreien Bewegung einzuführen, sind wir tief im Münchhausen-Trilemma gefangen.

Der Ausweg ist einmal mehr das Ausgehen von der Alltagspraxis, vom vorwissenschaftlichen Verständnis. Um „freie Teilchen“ zu identifizieren, beginnen wir beim Offensichtlichen und schließen zunächst alle Körper, die von Schnüren, Federn, Aufhängungen beeinflusst sind, aus der Betrachtung aus. In diese Richtung zielt auch Langes Formulierung des frei in den Raum gestoßenen und dann sich selbst überlassenen Teilchens.

Wir müssen aber auch nach nicht unmittelbar sichtbaren Kräften suchen, indem wir Gegenstände probenhalber aus dem Labor entfernen und beobachten, ob sich dadurch etwas an der Bewegung der betrachteten Teilchen ändert (später kann man diese Gegenstände – z. B. Magnete oder elektrisch geladene Körper – wieder nutzen, um die Wirkung von Kräften zu untersuchen). Die schrittweise Annäherung an das Ideal der freien Teilchen ist ein iterativer Prozess, den man als **Abschirmen** bezeichnen kann. Problematisch ist die Gravitationskraft, die sich nicht abschirmen lässt. Auf sie müssen wir gesondert eingehen.

Wenn wir auch im Lauf der Zeit Erfahrungen sammeln, mit welchen Verfahren sich freie Teilchen immer besser realisieren lassen, ist das Ergebnis immer als vorläufig zu betrachten. Es kann sich jederzeit herausstellen, dass es Einflüsse gibt, die wir nicht berücksichtigt haben. Dann sind neue Abschirmungen nötig – aber es bietet sich auch die Gelegenheit zur Untersuchung „neuer Physik“.

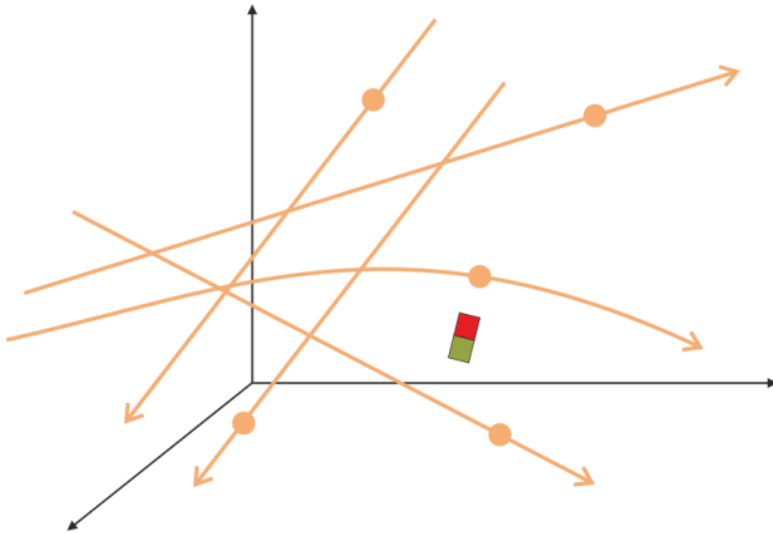


Abb. 2: Ein Schwarm von in den Raum gestoßen und dann sich selbst überlassenen Teilchen. Eines davon beschreibt eine gekrümmte Bahn. Es ist zu prüfen, ob man Gegenstände finden kann, auf deren Einfluss man die Abweichung von der geradlinigen Bewegung zurückführen kann.

9 Unbeschleunigte und nichtrotierende Bezugssysteme

Mit den auf diese Weise vorläufig identifizierten freien Teilchen führen wir nun Experimente durch. Sie werden weggestoßen und sich selbst überlassen. Dabei nutzt die Beobachtung eines einzelnen Teilchens noch wenig. Wir müssen einen ganzen Schwarm von Teilchen beobachten, die in verschiedene Richtungen gestoßen werden (Abb. 2). Bei der Beobachtung ihrer Bahnen kann dann einer der folgenden drei Fälle eintreten:

1. *Alle Teilchen bewegen sich auf geradlinigen Bahnen.* Dann nennen wir das Bezugssystem, in dem wir die Bewegung beschreiben, **unbeschleunigt** und **nichtrotierend**. Dieses Beobachtungsergebnis beinhaltet eine über die Definition hinausgehende empirische Aussage: Es lassen sich in der Natur solche Bezugssysteme auffinden. Es wäre auch das gegenteilige experimentelle Ergebnis denkbar: dass es mit keinem noch so großen Bemühen gelingt, diese Situation herzustellen.
2. *Manche Teilchen bewegen sich auf geradlinigen, manche auf gekrümmten Bahnen.* In diesem Fall ist der Prozess der Abschirmung noch nicht weit genug vorangetrieben. Man muss prüfen, ob man Gegenstände finden kann, auf deren Einfluss sich die Abweichung von der geradlinigen Bewegung zurückführen lässt (Abb. 2).
3. *Alle oder fast alle Teilchen bewegen sich auf gekrümmten Bahnen.* In diesem Fall könnte es sich um ein vollständiges Versagen aller Abschirmungsbemühungen handeln. Wenn dies ausgeschlossen werden kann, liegt ein linear beschleunigtes oder rotierendes Bezugssystem vor.

Nachdem auf diese Weise der schwierige Begriff des freien Teilchens erklärt ist, können wir unbeschleunigte und nichtrotierende Bezugssysteme in Kurzform folgendermaßen charakterisieren:

In unbeschleunigten und nichtrotierenden Bezugssystemen bewegen sich freie Teilchen auf geradlinigen Bahnen.

Zwar lässt sich die newtonsche Mechanik auch in linear beschleunigten und rotierenden Bezugssystemen formulieren, aber zur Einführung der Grundbegriffe müssen wir diese Bezugssysteme ausschließen und uns auf unbeschleunigte und nichtrotierende Bezugssysteme beschränken.

Es ist bemerkenswert, dass wir von Längen- oder Zeitmessungen bisher keinerlei Gebrauch machen mussten (außer zur Konstruktion der rechtwinkligen Bezugssystem-Achsen, die aber in die bisherigen Überlegungen noch nicht eingeflossen sind). Alles, was wir zur Explikation der Begriffe des freien Teilchens und des unbeschleunigten und nichtrotierenden Bezugssystems voraussetzen mussten, war der Begriff der geradlinigen Bahn. Dazu treten die vorwissenschaftlichen Begriffe, mit denen wir z. B. den Vorgang der Abschirmung beschrieben haben. Der schwierigste Schritt auf dem Weg zur Einführung der newtonschen Gesetze ist damit getan.

10 Die Sonderrolle der Gravitation

Es wurde schon erwähnt, dass die Gravitation eine Sonderrolle spielt. Sie lässt sich nicht abschirmen. In unserer Alltagswelt können wir täglich beobachten, dass sich geworfene Körper *nicht* auf geraden Bahnen bewegen, dass also der oben beschriebene Fall 3 eintritt. Lässt sich die Nicht-Abschirmbarkeit der Gravitation durch Auffinden eines geeigneteren Bezugssystems beheben?

Das ist in der Tat möglich: Man muss sich dazu in ein frei fallendes Bezugssystem begeben. Frei fallend heißen Körper, wenn sie sich nur unter dem Einfluss der Gravitation bewegen. In einem frei fallenden Behälter (etwa im Fallturm in Bremen) bewegen sich geworfene Körper tatsächlich auf geraden Bahnen. Bekannt ist auch der Parabelflug, bei dem das Flugzeug die Flugbahn eines frei fallenden Körpers verfolgt (wegen des Luftwiderstands müssen dazu trotzdem die Triebwerke laufen). Dabei herrscht nicht nur Schwerelosigkeit, sondern geworfene Körper bewegen sich auch auf geradlinigen Bahnen. Ein weiteres Beispiel für ein frei fallendes Bezugssystem ist eine Raumstation wie die ISS, die sich auf ihrer Umlaufbahn nur unter dem Einfluss der Gravitation bewegt.

Frei fallende Bezugssysteme bieten somit eine Möglichkeit, unbeschleunigte und nichtrotierende Bezugssysteme auch unter dem Einfluss von Gravitation zu realisieren. Dies ist allerdings nur lokal möglich, insofern man das Gravitationsfeld als homogen (d. h. überall gleich gerichtet) ansehen kann.

11 Uhren und Inertialzeit

Mit Hilfe von Längen- und Zeitmessungen können wir die Bahnen freier Teilchen noch genauer charakterisieren. Um logische Zirkel zu vermeiden, gehen wir zunächst wieder von vorwissenschaftlichen Verfahren der Längen- und Zeitmessung aus, wie es historisch z. B. Galilei durch Bezug auf den Pulsschlag und mit Wasseruhren getan hat. Mit diesen einfachen Mitteln lässt sich die Bewegung freier Teilchen untersuchen. Es zeigt sich, dass sie in gleichen Zeitspannen gleiche Wege zurücklegen – so gut es jedenfalls mit den vorhandenen Messmitteln überprüfbar ist. Bessere Uhren und genauere Maßstäbe, die wir später unter Benutzung der voll entwickelten Theorie konstruieren, bestätigen diese Feststellung. Durch Bezug auf das gleichmäßige Fortschreiten freier Teilchen lässt sich eine „Inertialzeit“ definieren, bei der die Zeit durch die Position eines freien Teilchens angezeigt wird. Im wissenschaftlichen Spiralprozess der Konstruktion immer besserer Uhren stellt man Konsistenz fest: Die so definierte Inertialzeit weicht nicht von der „Pendelschwingungs-Zeit“ oder der „Atom-Zeit“ ab.

Wieder begegnet uns hier der Doppelcharakter von Definition und empirischer Aussage. Betrachtet man die Bewegung eines einzelnen freien Teilchens, kann diese zur Festlegung einer Zeitskala herangezogen werden, die unabhängig von Pulsschlag, Pendeln oder Atomen ist. Damit handelt es sich um eine Definition. Die empirische Aussage liegt darin, dass die Bewegung *jedes weiteren* freien Teilchens *gleichförmig* ist – bezogen auf die durch das erste Teilchen definierte Zeitskala. Dies ist eine im Experiment prüfbare Aussage, die jederzeit durch ein gegenteiliges experimentelles Ergebnis falsifiziert werden könnte.

Auch bei der Überprüfung der Gleichförmigkeit kann der Fall auftreten, dass sie nur für einige, aber nicht für alle Teilchen festgestellt werden kann. Dann handelt es sich möglicherweise wieder um unzureichende Abschirmung, d. h. das betreffende Teilchen ist vielleicht gar kein freies Teilchen. Wie im oben behandelten Fall 2 muss dann nach Gegenständen gesucht werden auf deren Einfluss die Abweichung von der gleichförmigen Bewegung zurückgeführt werden kann.

12 Inertialsysteme und Trägheitsgesetz

Ein unbeschleunigtes und nichtrotierendes Bezugssystem, in dem Zeitspannen mit Uhren gemessen werden, die sich nach der Inertialzeit richten, heißt **Inertialsystem**. Mit diesem Begriff sind wir nun in der Lage, das Trägheitsgesetz zu formulieren:

Trägheitsgesetz: In Inertialsystemen ist die Bewegung freier Teilchen geradlinig und gleichförmig.

Man erkennt nun, dass das Trägheitsgesetz keineswegs als spezieller Fall des newtonschen Bewegungsgesetzes für $\vec{F} = 0$ misszuverstehen ist. In der knappen Formulierung, die wir ihm gegeben haben, sind es vor allem die Begriffe „Inertialsystem“ und „freies Teilchen“, die erklärungsbedürftig sind. Beide Begriffe werden zur Formulierung des newtonschen Bewegungsgesetzes nötig sein. Nur in Inertialsystemen hat das newtonsche Bewegungsgesetz seine vertraute Gestalt, und der Begriff der Kraft lässt sich erst als Abweichung von der geradlinig-gleichförmigen Bewegung der freien Teilchen formulieren. Die Bewegung der freien Teilchen entspricht damit bildlich gesprochen der „Nullstellung“ eines Kraftmessgeräts, die mit dem Kenntlichmachen freier Teilchen erst gefunden werden muss.

13 Versuche zum newtonschen Bewegungsgesetz

Jede Abweichung eines Körpers von der geradlinig-gleichförmigen Bewegung führen wir auf die Einwirkung einer Kraft zurück. Der Begriff Kraft wird dadurch definiert. Um von einer bloßen Benennung zur Definition einer physikalischen Größe zu gelangen, müssen wir Kräfte und ihre Wirkungen quantitativ erfassen. Dabei zeigt sich einmal mehr der Doppelcharakter von Definition und empirischem Gesetz, der entscheidend für die Beantwortung der zu Anfang des Kapitels gestellten Fragen ist.

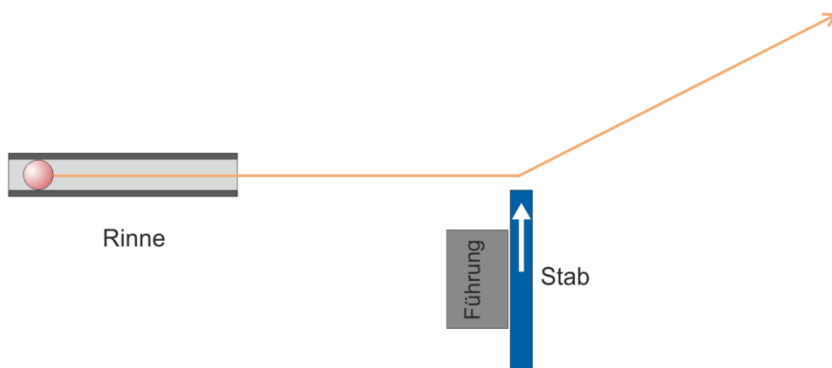


Abb. 3: Stoßversuch von Jung zur Einführung des newtonschen Bewegungsgesetzes. Mit dem Stab wird eine Kraft auf die Kugel ausgeübt. Sie bewirkt eine Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$.

Die Grundstruktur des newtonschen Bewegungsgesetzes lässt sich z. B. mit dem auf Jung zurückgehenden senkrechten Stoßversuch plausibel machen, der im Unterrichtskonzept zur zweidimensionalen Mechanik von Wiesner et al. [11] eine zentrale Rolle spielt (Abb. 3). In der Sprache der vorigen Abschnitte lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

1. Die rollende Kugel ist eine näherungsweise Realisierung eines sich selbst überlassenen freien Teilchens. Sie bewegt sich geradlinig.
2. Die Abweichung von der geradlinigen Bewegung wird vom stoßenden Stab bewirkt. Wir interpretieren das als die Wirkung einer Kraft.
3. Die entscheidende Größe zur Beschreibung der Wirkung einer Kraft ist die **Geschwindigkeitsänderung** $\Delta \vec{v}$ bzw. die **Beschleunigung** \vec{a} . Das ist eine empirische Aussage. Alternative Hypothesen (wie etwa die häufig geäußerte Schülervorstellung $\vec{v}_{\text{nach}} \sim \vec{F}$ (dass also die Richtung der Geschwindigkeit nach dem Stoß der Krafrichtung entspricht) erweisen sich im Experiment als falsch.

Das Experiment führt uns zu einem quantitativen Zusammenhang der Form:

$$\vec{f} = \vec{a},$$

wobei \vec{a} die Beschleunigung und \vec{f} eine „kraftartige“ Größe ist, die begrifflich noch näher ausgeschärft werden muss. Es zeigt sich nämlich experimentell, dass noch ein anderer Faktor eine Rolle spielen muss, der nicht der Einwirkung (dem stoßenden Stab), sondern dem beschleunigten Körper zuzuordnen ist. Die gleiche Einwirkung verursacht nämlich bei verschiedenen Körpern unterschiedliche Geschwindigkeitsänderungen (beispielsweise bei Fußball und Medizinball). Wir führen dies auf eine Eigenschaft der Körper zurück, die als **Masse** bezeichnet wird. Die Aufgabe besteht nun darin, Kraft und Masse begrifflich zu trennen und dabei zwischen Definition und empirischem Naturgesetz zu unterscheiden.

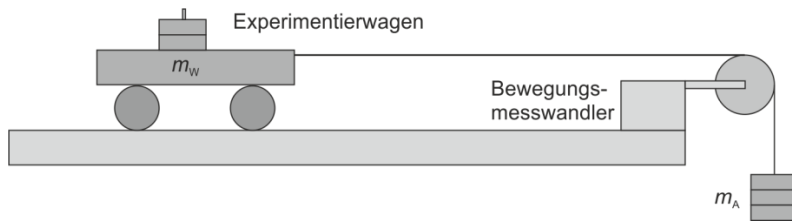


Abb. 4: Grundsätzlicher Aufbau des Fahrbahnversuchs

Dazu eignet sich der in den meisten Oberstufen-Schulbüchern (z. B. [12]) beschriebene Fahrbahnversuch (Abb. 4). Seine beiden Teile liefern die prinzipielle Vorgehensweise: Im ersten Teil (konstant gehaltene Kraft) wird der Begriff der Masse festgelegt; der zweite Versuchsteil (konstant gehaltene Masse) dient zur Definition des Begriffs Kraft.

Die beiden Versuche -- senkrechter Stoß und Fahrbahnversuch – haben dabei unterschiedliche Rollen: Der senkrechte Stoß dient dazu, die Grundstruktur des newtonschen Bewegungsgesetzes zu erkunden und eine experimentell prüfbare Hypothese zu formulieren (Kräfte verursachen Geschwindigkeitsänderungen). Im Fahrbahnversuch wird diese Hypothese quantitativ geprüft, und es werden die Parameter identifiziert, die die Bewegungsänderung beeinflussen.

14 Der Begriff Masse

Der erste Teil des Versuchs (Abb. 5) wird mit *unterschiedlichen Körpern* in einer *gleichbleibenden Umgebung* durchgeführt. Das soll bedeuten: Wir setzen verschiedene Körper der jeweils gleichen Einwirkung aus und untersuchen die daraus resultierende Beschleunigung. Im Fahrbahnversuch bedeutet „gleiche Einwirkung“, dass wir immer das gleiche Gewichtsstück über die Umlenkrolle zur Beschleunigung verwenden (sozusagen als „Referenzkraft“ – ohne dass uns das Wort Kraft schon zur Verfügung stünde). Wir könnten aber auch eine beliebige andere Einwirkung festlegen (ein bestimmter Magnet, eine bestimmte Feder), solange nur die Versuchsumstände jeweils genau bestimmt sind.

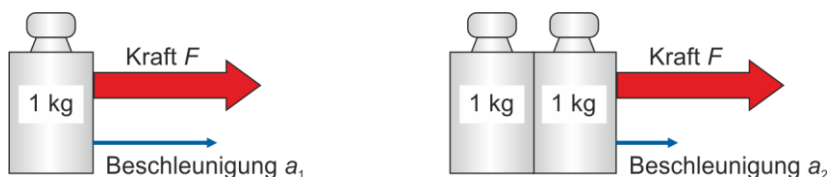


Abb. 5: Beschleunigung verschiedener Körper mit konstanter Kraft

Wir setzen also Kontrollierbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit voraus. In Abb. 5 soll der in beiden Teilbildern gleich gezeichnete rote „Kraftpfeil“ diese gleichbleibenden Versuchsumstände symbolisieren. Dass die beschleunigte Gesamtmasse beim Fahrbahnversuch auch noch das absinkende Gewichtsstück umfasst, ist eine Eigenheit dieser speziellen Versuchsanordnung, die beim Experimentieren berücksichtigt werden muss, im Folgenden aber nicht weiter thematisiert werden soll.

Zur Einführung des Massebegriffs wird nun nicht mit beliebigen unterschiedlichen Körpern experimentiert, sondern in ganz bestimmter Weise. Wir greifen uns einen beliebigen Körper heraus

und versehen ihn mit der Aufschrift „1 kg“. Mit diesem Körper führen wir den Beschleunigungsversuch durch und messen die Beschleunigung. Nun fertigen wir eine möglichst exakte Kopie des 1-kg-Körpers an. Bevor wir weiter experimentieren, stellen wir eine axiomatische Forderung auf:

Die Masse ist additiv. Die Masse eines aus zwei gleichen Körpern zusammengesetzten Systems ist doppelt so groß wie die Masse der einzelnen Körper.

Damit ist der Begriff der Masse quantitativ erfasst. Wir können die drei grundlegenden Operationen durchführen, durch die eine physikalische Größe quantitativ beschrieben wird:

1. Feststellen der *Gleichheit*: Zwei Körper haben die gleiche Masse, wenn sie von der oben definierten Referenzeinwirkung gleich beschleunigt werden.
2. Festlegung der *Vielfachheit*: Was es bedeutet, dass ein Körper die doppelte, dreifache oder zehnfache Masse hat wie ein anderer wird durch die im Merksatz aufgestellte Forderung festgelegt. Durch Verfeinerung der Vergleichsmassen (Herstellen eines Wägesatzes) lassen sich im Prinzip beliebig genaue Massenvergleiche herbeiführen.
3. Festlegung der *Einheit*: Um die Einheit der Masse, das Kilogramm, festzulegen, wird ein materieller Referenzkörper herangezogen (das Urkilogramm).

Mit dieser Massedefinition erhalten wir eine empirische Aussage aus dem Versuch: Bei doppelter Masse ist die Beschleunigung halb so groß (Abb. 5), oder allgemeiner: Die Beschleunigung ist umgekehrt proportional zur Masse

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

15 Definition der Kraft

Im zweiten Versuchsteil (Abb. 5) wird mit *demselben Körper in unterschiedlichen Umgebungen* experimentiert. Der gleiche Körper wird unterschiedlichen Einwirkungen (Kräften) ausgesetzt und die daraus resultierende Beschleunigung bestimmt. Im Fahrbahnversuch werden unterschiedlich viele Gewichtsstücke zur Beschleunigung verwendet – bei konstanter Gesamtmasse. Mit Hilfe dieser Experimente wird der Begriff der Kraft festgelegt.



Abb. 6: Beschleunigungsversuch mit konstanter Masse

Es liegt nahe, ganz analog zum ersten Versuchsteil vorzugehen und ein „Kraftnormal“ samt einer Krafteinheit festzulegen. Das ist möglich, aber unbefriedigend. Der Grund dafür ist, dass es nicht gelingt, überzeugend die Vielfachheit – also das Doppelte einer Kraft – zu definieren.

Dazu wissen wir an dieser Stelle noch zu wenig über die in der Natur vorkommenden Kräfte. Üben zwei Magnete eine doppelt so große Kraft auf einen Eisenkörper aus wie ein einzelner? Stimmt die so

definierte „doppelte Kraft“ mit derjenigen überein, die man bei der analogen Definition mit zwei Spiralfedern erhält? Das sind Fragen, die man lieber später empirisch im Experiment klären möchte, als sie durch eine axiomatische Forderung festzulegen.

Viel natürlicher erscheint es, die Kraft anhand ihrer beschleunigenden Wirkung zu *definieren*: Die doppelte Kraft bewirkt die doppelte Beschleunigung (bei gleicher Masse). Damit ist die Beziehung

$$\vec{F} \sim \vec{a}$$

eine *Definition*, die sich nicht im Experiment überprüfen lässt. Der zweite Versuchsteil im Fahrbahnexperiment testet damit kein Naturgesetz, sondern bestätigt nur, dass wir mit doppelt so vielen Massestücken eine doppelt so große Gewichtskraft realisieren können.

16 Der erkenntnistheoretische Status des newtonschen Bewegungsgesetzes

Fassen wir noch einmal zusammen, welche Funktionen das newtonsche Bewegungsgesetz $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ in verschiedenen Zusammenhängen erfüllt. Damit werden die am Eingang des Artikels gestellten Fragen beantwortet. Allerdings fällt die Antwort komplexer aus, als es uns vermutlich lieb gewesen wäre.

1. Das newtonsche Bewegungsgesetz enthält die *empirische Aussage*: Kräfte bestimmen die *Beschleunigung* eines Körpers, sie ändern seine Geschwindigkeit. Diese Aussage wird mit Experimenten wie dem senkrechten Stoß getestet, in dem sich zeigt, dass sich alternative Vorstellungen (etwa $\vec{v}_{\text{nach}} \sim \vec{F}$) im Experiment nicht bestätigen lassen.
2. Es *definiert* die Gleichheit von zwei Massen: Zwei Körper haben die gleiche Masse, wenn sie durch die gleiche Kraft die gleiche Beschleunigung erfahren.
3. Es enthält weiterhin als *empirische Aussage*: Bei konstanter Kraft ist die Beschleunigung umgekehrt proportional zur Masse der Körper. Diese Aussage lässt sich in Experimenten überprüfen, in denen man Körper unterschiedlicher Masse durch die gleiche Kraft beschleunigt (unterschiedliche Körper in gleichbleibender Umgebung).
4. Es *definiert* die Kraft durch ihre beschleunigende Wirkung. Kräfte lassen sich in Beschleunigungsexperimenten messen, in denen der jeweils gleiche Körper in unterschiedliche Umgebungen gebracht wird.

Nachdem nun die Begriffe der Kraft und der Masse geklärt sind, kann das newtonsche Bewegungsgesetz zur weiteren Erforschung der Natur genutzt werden. Die linke Seite von $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ muss noch mit Leben gefüllt werden, indem verschiedene Kraftsorten untersucht werden: Das newtonsche Bewegungsgesetz legt nur den universellen Kraftbegriff fest. Die in der Natur vorkommenden spezifischen Kräfte können mit seiner Hilfe quantitativ untersucht werden, und es lassen sich Kraftgesetze auffinden. Erst dadurch wird aus dem newtonschen Bewegungsgesetz ein anwendbares Werkzeug zur Beschreibung von Naturphänomenen.

Von der Spiralfeder bis zur Gravitation und zur elektromagnetischen Wechselwirkung lassen sich Kräfte nun untersuchen und vergleichen. Weil durch die Kraftdefinition geklärt ist, was unter „gleich großen Kräften“ zu verstehen ist, muss man Kraftmessungen auch nicht ausschließlich über Beschleunigungsversuche vornehmen, sondern kann sie z. B. mit Hilfe einer Spiralfeder durchführen (Kraftmesser).

Beim Erforschen der Kraftgesetze zeigt sich fernerhin, dass nicht alle Körper gleicher Masse in der gleichen Umgebung gleich reagieren. Die Größe einer Kraft, die in einer bestimmten Umgebung auf

einen Körper wirkt, hängt nicht nur von den Eigenschaften der Umgebung ab, sondern auch von bestimmten Eigenschaften der Körper. Es wird notwendig, *Ladungen* als Eigenschaften von Körpern zu definieren. Beim Erforschen der Kraftgesetze gilt es, diese Merkmale nach und nach herausfinden.

Es erscheint nicht von vornherein sicher, dass solch komplexes Programm zur Erforschung der Natur von Erfolg beschieden sein kann. Die Geschichte der Physik zeigt, dass dieser der Fall ist. Einer der Gründe dafür ist sicher, dass es nur eine Handvoll fundamentaler Wechselwirkungen gibt, deren Gesetze eine relativ unkomplizierte Struktur aufweisen. Die Grundgesetze der Physik sind einfach -- deshalb ist die Physik so erfolgreich.

Literatur

- [1] R. Müller, *Klassische Mechanik – vom Weitsprung zum Marsflug*, Berlin: de Gruyter (2009).
- [2] H. Hertz, *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt*, Leipzig: Meiner (1894), S. 8.
- [3] G. Ludwig, *Einführung in die Grundlagen der theoretischen Physik. Band 1: Raum, Zeit, Mechanik*. Düsseldorf: Bertelsmann (1974).
- [4] J. Audretsch, *Ist die Raum-Zeit gekrümmt? Der Aufbau der modernen Gravitationstheorie*. In: J. Audretsch, K. Mainzer (Hrsg.), *Philosophie und Physik der Raum-Zeit*, Mannheim: BI (1988).
- [5] J. Audretsch, *Konstruktionen -- Was der Physiker von der Wirklichkeit weiß*. In: J. Audretsch und K. Nagorni (Hrsg.), *Von Wissen und Weisheit - Theologie und Naturwissenschaft im Gespräch*, Evangelische Akademie Baden, Karlsruhe, 2008.
- [6] J. Ehlers, *Einführung der Raum-Zeit-Struktur mittels Lichtstrahlen und Teilchen*. In: J. Audretsch, K. Mainzer (Hrsg.): *Philosophie und Physik der Raum-Zeit*, Mannheim: BI (1988).
- [7] P. Duhem, *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*, Leipzig: Johann Ambrosius Barth (1908), S. 201 ff.
- [8] H. Albert, *Traktat über kritische Vernunft*, Tübingen: Mohr Siebeck (1968; ⁵1991), S. 15 f.
- [9] W. Kamlah, P. Lorenzen, *Logische Propädeutik. Vorschule des vernünftigen Redens*, Mannheim: BI (1973).
- [10] L. Lange, *Ueber die wissenschaftliche Fassung des Galilei'schen Beharrungsgesetzes*, *Philosophische Studien* 2, 266 (1885).
- [11] H. Wiesner et al., *Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung. Neuer fachdidaktischer Zugang zur Mechanik (Sek. 1)*, Aulis-Verlag, 2011.
- [12] R. Müller (Hrsg.), *Dorn/Bader Physik SII Niedersachsen, Einführungsphase Klasse 11*, Braunschweig: Westermann (2018).